

周年磷肥旱季集中底施对 玉-稻轮作磷肥效应的影响^{*1}

袁国印¹ 韩玉玲¹ 陈文¹ 方雪东¹ 王丹¹ 李萍¹ 展茗^{1*} 赵明^{2*}

(1. 华中农业大学植物科学技术学院, 农业部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室, 湖北武汉 430070;

2. 中国农业科学院作物科学研究所, 农业部作物生理生态重点实验室, 北京 100081)

【摘要】:春玉米—晚稻水旱轮作是近年来南方稻区种植制度变化下出现的新型两熟制模式。明确两季作物间磷肥的合理分配对玉—稻轮作作物产量与磷素利用效率的影响, 对玉—稻轮作养分高效与高产协同实现, 及丰富对水旱轮作前后季作物养分利用关系的认识具有理论意义。采用春玉米—水稻周年轮作田间试验, 根据晚稻季磷肥前移至玉米季做底肥施用的比例及周年施磷量, 设置 7 个磷肥施用处理, 分别为两季作物均不施磷(P0)、两季作物均按常规方法施磷(P1)、1/3 晚稻季磷肥前移(P2)、2/3 晚稻季磷肥前移(P3)、全部晚稻季磷肥前移(P4)、全部晚稻季磷肥前移且周年总施磷量减少 15%(P5)、全部晚稻季磷肥前移且周年总施磷量减少 30%(P6), 分析了不同施磷处理作物产量、磷素吸收量及磷素利用效率的变化。与 P1 相比, P3 与 P4 处理显著提高了晚稻花后干物质的分配比例及晚稻产量, 且其周年产量分别提高了 4.87% 和 6.74%; P5 处理晚稻产量与 P1 处理差异不显著, 但 P6 显著降低了晚稻产量。晚稻季磷肥前移施用明显促进了玉米及晚稻对磷素的吸收, 显著降低了磷素的表现盈余量。与 P1 处理相比, P2、P3、P4 处理两季作物周年土壤磷素依存率分别减少了 11.63%、26.47% 与 22.08%。从磷肥利用效率看, P4 处理的磷肥周年累积回收效率、农学利用效率、偏生产力及磷肥产量贡献率均显著高于 P1 处理, 分别提高了 102.46%、194.83%、6.73% 与 176.16%。与 P1 处理相比, P5 处理周年磷肥产量贡献率及农学利用效率差异不显著, 但分别提高了其磷肥回收效率与偏生产力 32.56% 和 58.05%。玉米季施用的磷肥对晚稻有明显的后效作用, 且比晚稻季施用磷肥具有更高的磷肥利用效率。所以在春玉米免耕复种晚稻时, 可将晚稻季的磷肥全部前移至玉米季施用, 并可减少 15% 周年施磷量。

【关键词】:玉-稻轮作; 产量; 磷素吸收; 磷肥利用率

【中图分类号】:S532 **【文献标识码】:**A **【文章编号】:**1004-8227(2017)12-2137-09

¹ 收稿日期:2017-03-01; 修回日期:2017-04-06

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(20150312210) [Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China(201503122)] ; 国家重点研发计划资助(2016YFD0300308) [National Key Research and Development Program of China(2016YFD0300308)]

作者简介:袁国印(1985~), 男, 硕士研究生, 主要从事作物养分高产高效研究. E-mail:hyl_lch0211@sina.com

***通讯作者** E-mail:zhanming@mail.hzau.edu.cn;zhaomingcau@163.net

磷是作物必需的营养元素之一,施磷是作物增产和稳产的重要措施之一。由于磷在土壤中的移动性差,易被土壤吸附固定,向根系扩散能力偏低,所以磷肥的当季利用率偏低^[1],我国主要粮食作物磷肥当季利用率仅为7.3%~20%^[2]。但有研究表明磷肥后效时间长,在多熟制下前季作物施用的磷肥对后季作物具有明显的后效^[3],其长期累积回收率应受到更多的关注^[4]。大田生产条件下,磷肥一般作为基肥深施,免耕条件下土表撒施磷肥更易造成磷的低效利用导致磷肥资源的浪费,加重水体的面源污染^[5]。因此,科学合理施用磷肥对提高磷肥当季利用效率、发挥其后效作用、减轻农业面源污染具有重要意义。水旱轮作是我国南方稻区主要的耕作制度之一,水旱轮作下由于水分季节性的交替变化,土壤 Eh 变化,改变了土壤中磷的形态,磷的有效性发生改变。Turner 等(2003)^[6]发现土壤干湿交替过程增强了磷的溶解性,在稻田淹水后,由于 Fe³⁺的还原,以及 Ca-P 化合物溶解度的增加,磷对水稻的有效性提高。而由水作向旱作模式转换后,磷的有效性降低,主要是影响了无机磷的形态组成^[7,8],进入土壤中的磷素很容易与土壤中的 Fe³⁺、Al³⁺、Ca²⁺等离子形成 Al-P、Fe-P、Ca-P 等难溶化合物并被吸附在土壤颗粒的表面。水旱轮作下磷肥在两季间的合理分配及施用量对提高磷肥的周年利用效率、减少面源污染具有重要意义。由于磷肥肥效缓慢,持续时间长,在生产过程中要根据不同轮作方式的养分利用特性来合理地确定肥料的施用量^[9]。范明生等(2008)^[10]提出了水旱轮作的“重旱轻水”磷肥施用策略。Yadvinder-Singh 等(2000)^[8]研究表明,在试验条件下,为了获得稳定的作物产量,稻麦系统磷投入总量应控制在一定范围内,小麦季磷的投入量应大于水稻季磷的用量,可以提高磷肥的利用效率。玉-稻系统是两种作物协同生产的一种水旱轮作种植模式。研究表明,与稻-稻、稻-麦种植模式相比,玉-稻模式具有增产潜力大,光温资源利用效率高和经济效益高的优势^[11,12],其产量潜力可达 15~22t/hm²^[13]。该模式在东南亚等国家发展较快^[13],近年来玉-稻水旱轮作在长江中下游稻区也开始发展,因春玉米与晚稻之间空闲期较短,生产中往往采用玉米收获后免耕移栽晚稻的方式,晚稻季施肥多为土表撒施,不利于肥料的吸收利用。目前关于玉-稻水旱轮作前后季作物间磷肥利用关系及周年磷肥合理施用方式等方面的研究鲜有报道。为此,本文通过周年春玉米-晚稻免耕轮作试验,研究两季磷肥集中在春玉米季做底肥深施对作物产量及磷肥利用效率的影响,初步明确玉米季施用的磷肥对晚稻的后效作用,为玉-稻轮作周年磷肥合理分配施用、提高磷肥利用效率、发挥周年内磷肥综合增产效应提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015 年 3~11 月在湖北省武穴市现代农业示范中心试验基地(30° 00' N, 115° 44' E)进行,该区域属亚热带季风性湿润气候,1980~2013 年期间年均日照辐射总量为 4472MJ/m²,年平均气温 17.6℃,年平均降水量 1408mm。试验田土壤为黄棕壤,0~30cm 耕层含有机碳 12.6g/kg、全氮 1.01g/kg、硝态氮 6.05mg/kg、铵态氮 12.23mg/kg、全磷 0.40g/kg、速效磷 16.45mg/kg、全钾 2.35g/kg、速效钾 100.5mg/kg, pH6.85。

1.2 试验设计及田间管理

试验采用的种植方式为春玉米收获后免耕复种晚稻,共设置 7 种磷肥施用处理,包括:(1)P0:春玉米与晚稻季均不施磷肥;(2)P1:春玉米与晚稻按当地农民习惯用量及方式施用;(3)P2:将晚稻季 1/3 的磷肥前移同玉米基肥一起施用;(4)P3:将晚稻 2/3 的磷肥前移同玉米基肥一起施用;(5)P4:将晚稻全部磷肥前移同玉米基肥一起施用;(6)P5:将晚稻全部磷肥前移同玉米基肥一起施用,且周年总磷肥用量减少 15%;(7)P6:将晚稻全部磷肥前移同玉米基肥一起施用,且周年总磷肥用量减少 30%。各处理磷肥施用量及方式见表 1。每个处理重复 3 次,随机区组排列,小区面积长为 6m×5.2m、小区的间距为 60cm。每个小区四周做埂,宽 30cm,并用黑膜覆盖包埂,防止串水串肥。两季作物均采用当地生产中推广的品种,春玉米品种为郑单 958,晚稻品种为岳优 9113。

表 1 不同处理磷肥(P₂O₅)施用量(kg /hm²)

处理	玉米季	晚稻季	周年
p ₀	0	0	0
P ₁	150	126	276
p ₂	192	84	276
p ₃	234	42	276
p ₄	276	0	276
p ₅	234	0	234
p ₆	192	0	192

春玉米播种前用机械开沟做厢，厢宽为 2m，沟宽为 40cm。春玉米于 2015 年 3 月 14 日播种，播种前在 40cm 窄行中间开沟施底肥。春玉米采用 40cm+80cm 宽窄行种植，每厢 4 行，按 22.2cm 株距人工点播，覆土后人工覆膜。玉米出苗后及时破膜放苗，3 叶期间苗，5 叶期定苗，定苗密度每公顷 7.5×10^4 株。玉米季施 N240kg/hm²，按基肥：拔节肥：穗肥=4：2：4 施用；施 K20 为 210kg/hm²，50%作基肥，50%作穗肥；P205 按各处理要求做基肥施用。基肥均在播种前开沟深施，追肥均为撒施。玉米于 7 月 16 日收获。晚稻采用钵盘育秧，人工移栽。秧盘规格为 60cm×33cm×2.5cm 的 353 孔秧盘育秧，6 月 26 日播种，每孔播 3 粒种子。玉米收获后，按小区放水泡田，在厢面撒施基肥，耙平修齐厢面。7 月 25 日免耕移栽晚稻，栽插规格为 27cm×12cm，栽插密度为 30.9×10^4 穴/hm²。晚稻季施 N180kg/hm²，按基肥：蘖肥：穗肥为 4：2：4 施用；施 K20 为 150kg/hm²，50%作基肥，50%作穗肥；P205 按各处理要求做基肥施用。玉米季及晚稻季施用的氮肥均采用尿素，磷肥为过磷酸钙，钾肥为氯化钾。晚稻茎蘖数达到预期穗数的 80%时，开始排水搁田，拔节至成熟期采用干湿交替的水分管理模式，收获前一周断水。晚稻于 11 月 10 日收获。按当地大面积生产统一实施病虫害防治。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品的采集与处理

玉米播种前、吐丝期、收获期、晚稻齐穗期、成熟期采用 S 形 10 点取样法分别取 0~20cm 土层的土样，室内风干，去除杂草、石砾和植物残株等杂物用于土壤养分含量的测定。在玉米开花期和生理成熟期，各小区取有代表性的植株 3 株，分解为茎、叶、穗轴、苞叶、籽粒 5 部分，105℃杀青 30min，80℃烘干至恒重后称重。水稻于齐穗期和成熟期，各小区取 6 穴代表性样株(分蘖数=全田平均分蘖数)，分解为茎、叶、穗 3 部分，105℃杀青 30min，80℃烘干至恒重后称重计算生物量。对样品进行粉碎处理用于养分含量测定。

1.3.2 产量及其构成因素测定

在玉米收获前对每个小区进行实收穗数调查；玉米达到生理成熟后，每个小区在中间两行连续取 20 株果穗，自然晾晒风干后进行拷种脱粒，确定穗粒数和百粒重，用 PM8088 谷物水分测定仪测定籽粒含水量，按 14%籽粒含水量折算单位面积产量。水稻收获前每个小区连续调查 30 穴，计算单位面积有效穗数和穗粒数，各小区选取生长均匀的 5m²测产，脱粒并晒干，风选清除杂质后，测定总重和籽粒含水量，按 14%含水量折算单位面积产量。

1.3.3 土壤及植株养分含量的测定

土壤基本理化性状按常规分析方法测定^[14]。土壤有效磷(Olsen-P)的测定采用 0.5mol/LNaHCO₃浸提—钼蓝比色法^[14]。粉碎的植株样品采用浓硫酸—双氧水消煮，连续流动分析仪(Alliance Instruments, France)测定植株各器官磷含量。

1.3.4 相关指标的计算

参考黄晶等(2016)^[15] 计算磷素的表观平衡;参考张国桥等(2014)^[16] 计算各磷素利用效率指标。

磷素的表观平衡(kg/hm²)=施入土壤中的磷素总量－作物(籽粒和秸秆)吸收的磷素总量

磷肥贡献率(%)=(施磷区作物产量－不施磷区作物产量)/施磷区作物产量×100%;

土壤磷素依存率(%)=不施磷区地上部周年吸磷量/施磷区地上部周年吸磷量×100%;

磷肥农学利用率(kg/kg)=(施磷区周年产量－不施磷区周年产量)/周年总施磷量;

磷肥回收效率(%)=(施磷区周年磷累积量－不施磷区周年磷累积量)/周年总施磷量×100%;

磷肥偏生产力(kg/kg)=施磷区周年产量/周年总施磷量。

1.4 统计方法

试验数据采用 MicrosoftExcel2007 进行处理, 利用 SAS8.0 数据处理系统进行方差分析和 LSD 多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同磷肥施用处理对玉米-晚稻轮作作物干物质积累的影响

由表 2 看出, 周年磷肥施用方法对玉米及晚稻干物质积累及花前、花后的分配均有显著影响。玉米吐丝期, P4 处理玉米干物质积累量显著高于常规施肥处理(P1) (p<0.05), 其它施磷处理则与 P1 处理差异不显著。在玉米成熟期, 与常规施肥处理(P1)相比, P3、P4、P5 处理玉米生物量显著增加(p<0.05), 而 P2 与 P6 处理则差异不显著。不同施磷处理没有显著影响玉米花前与花后干物质分配比例。与常规施肥(P1)相比, 各磷肥前移处理晚稻齐穗期干物质积累量均没有显著变化。在晚稻成熟期, P3 处理生物量显著高于其它各处理(p<0.05), 而其它各磷肥前移处理(P2、P4、P5、P6)则与 P1 差异不显著。与常规施肥(P1)相比, P3 处理显著提高了晚稻花后与花前干物质比例(p<0.05), 其它磷肥前移处理(P2、P4、P5、P6)则没有明显变化。可见, 将晚稻季磷肥提前到玉米季做基肥一起施用对玉米及晚稻干物质生产没有造成不利的影响, 且 2/3 及全部晚稻磷肥前移施用处理玉米及晚稻具有较高的干物质生产潜力。

表 2 不同施磷处理春玉米和晚稻地上部生物量(t/hm²)

处理	春玉米			晚稻		
	吐丝期	成熟期	花后/花前	齐穗期	成熟期	花后/花前
P ₀	6.97b	16.78c	1.409a	10.30a	13.70c	0.291c
P ₁	7.16b	17.16bc	1.398a	11.04a	15.35b	0.390bc

p ₂	7.19b	17.55ab	1.445a	10.45a	16.03b	0.540ab
p ₃	7.44ab	17.98a	1.417a	11.27a	17.97a	0.591a
p ₄	7.75a	17.96a	1.317a	10.63a	15.93b	0.499ab
p ₅	7.33b	17.81a	1.431a	10.66a	14.80b	0.388bc
p ₆	7.29b	17.59ab	1.412a	10.27a	14.87b	0.391bc

2.2 不同磷肥施用处理对玉米—晚稻轮作产量及产量构成的影响

由表3看出,不同磷肥施用处理对春玉米穗数有显著影响,对穗粒数及百粒重影响不显著。与P1处理相比,P3处理显著提高春玉米单位面积的穗数,P2、P4、P5及P6处理的春玉米单位面积穗数虽有增加趋势,但处理间差异不显著。同时,P4处理春玉米产量显著高于P1、P2及P6处理,且分别提高了10.9%、7.7%和8.3%,这可能是由于其粒重及穗数都较高;而其它各磷肥前移使用处理产量则与P1处理差异不显著。

表3 不同施磷处理玉米和晚稻产量构成

处理	春玉米				晚稻				周年产量 (kg/hm ²)
	穗数 (x10 ⁴ /hm ²)	穗粒数	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	穗数 (x10 ⁴ /hm ²)	穗粒数	千粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)	
P ₀	7.35c	408.0a	29.8b	8 653b	369a	81.9b	28.4b	8 976c	17 628e
P ₁	7.42bc	421.0a	30.1ab	8 834b	385a	92.3ab	28.9ab	9 426b	18 259cd
P ₂	7.49abc	435.8a	30.3ab	9 044b	385a	99.5a	28.8ab	9 772a	18 815abc
P ₃	7.61a	424.0a	30.6ab	9 241ab	393a	104.6a	28.9ab	9 909a	19 150ab
P ₄	7.57ab	428.3a	31.2a	9 794a	378a	99.5a	29.2a	9 693a	19 486a
P ₅	7.55ab	431.9a	30.3ab	9 186ab	374a	90.8ab	29.0ab	9 288bc	18 473bcd
P ₆	7.58ab	430.5a	30.3ab	9 091b	372a	91.1ab	28.7ab	8 982c	18 072c

除 P0 处理外，磷肥周年施用处理 (P0-6) 间对晚稻单位面积穗数、穗粒数及粒重影响均不显著 (表 3)。P2、P3 和 P4 处理晚稻产量均显著高于 P1 处理，这可能是由于其具有较高的穗粒数有关。P5 处理晚稻产量与 P1 处理差异不显著，但 P6 处理晚稻的产量却显著低于 P1 处理，可见，在本实验条件下，当晚稻季磷肥前移至玉米季作基肥时，周年总磷肥用量在减少 15% 时玉米季的残效磷可满足晚稻对磷的需求。同时从表 3 看出，与 P1 处理相比，P3 和 P4 处理周年产量分别增加了 4.87% 和 6.74%，差异达到了显著；而 P2、P5 和 P6 处理则与 P1 处理差异不显著。

2.3 磷肥施用方法对玉米-晚稻轮作土壤速效磷的影响

不同磷肥施用方法显著影响了玉米季及晚稻季土壤速效磷的水平 (表 4)。玉米收获时，不施磷处理 P0 土壤速效磷含量显著低于其它处理；随着玉米季磷肥用量的增大，土壤中的速效磷含量随之增加，P4 处理土壤速效磷含量显著高于常规施磷处理 (P1)，但其它施磷处理的速效磷含量则与 P1 处理差异不显著。晚稻收获时，周年磷肥用量不变的情况下，土壤速效磷含量较高，P4、P3、P2 处理均与常规施磷处理 P1 差异不显著；然而，稻季磷肥全部前移施用且周年总施磷量减少的处理土壤速效磷的含量也随之降低，P5 与 P6 处理均显著低于 P1 处理。

表 4 玉米收获与晚稻收获时土壤速效磷含量

处理	玉米收获 (mg /kg)	晚稻收获 (mg /kg)
P ₀	11.16c	13.30c
P ₁	12.20bc	16.27a
p ₂	13.50bc	16.52a
p ₃	15.82ab	14.95abc
p ₄	16.79a	15.92ab
p ₅	15.99ab	13.87bc
p ₆	15.03ab	12.68c

2.4 磷肥施用方法对玉米-晚稻轮作磷素吸收及土壤磷表观平衡的影响

本研究中的养分平衡为表观平衡，对于玉米和晚稻生长过程的养分损失 (如径流淋失等) 和其他养分的投入等忽略不计，所采用的养分平衡为肥料投入量与作物吸收量之间的差异。从表 5 可知，P0 处理玉米、水稻秸秆及籽粒磷含量都显著低于施磷处理。P3 和 P4 处理玉米秸秆及籽粒磷含量均显著提高高于 P1 处理；P2、P6 和 P7 处理玉米秸秆磷含量与 P1 处理差异不显著，但其籽粒磷含量则显著高于 P1 处理。与 P1 处理相比，各个磷肥前移施用处理间对水稻秸秆磷含量的影响不显著，但 P6 处理水稻秸秆磷含量显著降低。

不同磷肥施用处理显著影响玉米和晚稻磷素的吸收积累量 (表 5)。与 P1 处理相比，P3、P4 和 P5 处理均显著提高了玉米磷素累积量，且分别提高了 29.3%、32.5% 和 21.6%，P2 和 P6 处理与 P1 相比玉米磷素累积量差异不显著。从晚稻季来看，P2、P3 和 P4 处理水稻磷素累积量显著高于 P1 处理，分别提高了 18.7%、42.4% 和 24.2%，P5 和 P6 处理则与 P1 处理差异不显著。在本试验施磷水平下土壤周年磷为表观盈余，P1 处理磷素表观盈余量最高，达 58.65kg/hm²，不同稻季磷肥前移施用处理均可显著降低磷素的表现盈余量，促进磷素的表现平衡。可见，晚稻季磷肥前移至玉米季底施，有提高磷吸收的效果。

表 5 不同施磷处理玉米、晚稻成熟期磷吸收及土壤磷素平衡

处理	植株含磷量 (g/kg)				植株吸磷量 (kg/hm ²)		周年土壤表观磷盈余量 (kg/hm ²)
	玉米秸秆	玉米籽粒	晚稻秸秆	晚稻籽粒	玉米	晚稻	
P ₀	0.86d	1.77f	0.94b	2.25d	23.07d	20.58e	-43.65g
P ₁	1.31c	2.11e	1.29a	2.90c	30.55c	31.40d	58.65a
p ₂	1.35bc	2.41d	1.13ab	3.40b	33.04c	37.27bc	50.29b
p ₃	1.65a	2.79bc	1.28a	3.70a	39.50a	44.71a	36.39d
P ₄	1.57ab	3.21a	1.28a	3.69a	40.48a	39.01b	41.10c
p ₅	1.46abc	2.95b	1.29a	3.38b	37.15ab	34.55cd	30.61e
p ₆	1.52abc	2.59cd	1.01b	3.21b	34.23bc	31.56d	18.11f

2.5 磷肥施用方法对玉米-晚稻轮作磷肥贡献率和土壤磷素依存率的影响

表 6 表明不同磷肥施用处理对磷肥贡献率产生了显著的影响。与 P₁ 处理相比, P₃ 和 P₄ 均显著提高了玉米的磷肥贡献率; 而 P₂、P₅ 和 P₆ 处理玉米磷肥贡献率与 P₁ 处理差异不显著。晚稻季 P₃ 处理的磷肥贡献率最高, 是 P₁ 处理的 2.0 倍, 而 P₂、P₄ 和 P₅ 处理与 P₁ 处理的磷肥贡献率差异不显著。从周年来看, P₂、P₃ 和 P₄ 处理的玉米磷肥贡献率显著高于 P₁, 分别提高了 1.8 倍、2.9 倍和 2.8 倍, 而 P₅ 和 P₆ 处理与 P₁ 处理差异不显著。可见, 稻季磷肥前移至玉米季可以提高磷肥的增产作用。

表 6 不同施磷处理对玉米-晚稻轮作磷肥贡献率及磷素依存率的影响

处理	磷肥贡献率 (%)			土壤磷素依存率 (%)		
	春玉米	晚稻	周年	春玉米	晚稻	周年
P ₀						
P ₁	3.77c	3.93b	3.83c	75.52a	58.54a	70.50a
p ₂	5.54abc	7.81a	6.70b	70.33ab	49.25bc	62.30bc
p ₃	9.52a	10.20a	9.87a	58.45d	41.01d	51.84d
p ₄	8.78ab	8.27a	8.51ab	57.05d	46.98c	54.93d
p ₅	5.81abc	3.35b	4.56c	62.20cd	53.18ab	60.96c
p ₆	4.82bc	0.03c	2.42c	67.41bc	58.14a	66.39ab

土壤磷素依存率即土壤磷对作物磷营养的贡献率。表 6 表明, 与常规磷肥施用处理(P₁)相比, P₃、P₄、P₅、P₆ 显著降低了春玉米的土壤磷素依存率, 分别降低了 22.6%、24.5%、17.6%和 10.7%, 而 P₂ 没有显著性变化。晚稻季的 P₂、P₃、P₄ 的磷素依存率显著低于常规施磷处理(P₁), 分别降低了 15.8%、29.9%和 19.7%, 其他处理则与 P₁ 差异不显著。从周年来看, P₂、P₃、P₄、P₅ 的磷肥依存率显著低于常规施肥处理(P₁), 分别降低了 11.6%、26.5%、22.1%、13.5%, P₆ 与 P₁ 则无显著性差异。这说明 P₁、

P6 处理的周年吸收的磷主要来自于土壤，而 P2、P3、P4、P5 处理减少了对土壤磷的依赖性，提高了肥料的利用效率。

2.6 磷肥施用方法对玉米-晚稻轮作磷肥利用率的影响

表 7 不同施磷处理对玉米-晚稻轮作磷素周年利用效率的影响

处理	农学利用率 (kg/kg)	偏生产力 (kg/kg)	磷肥回收效率 (%)
P ₀			
P ₁	5.22b	151.4d	14.20d
P ₂	9.83b	156.0cd	21.14c
P ₃	16.01a	158.8cd	32.66a
P ₄	15.39a	161.6c	28.75ab
P ₅	8.25b	180.6b	26.27bc
P ₆	7.69b	215.4a	24.99bc

从表 7 可看出，在不减少周年施磷量的情况下，稻季磷肥 2/3 (P3) 及全部前移施用处理 (P4) 显著提高了玉-稻轮作磷素农学利用效率，是常规磷肥施用处理 (P1) 的 3.1 倍与 2.3 倍，其它磷肥施用处理则与 P1 处理差异不显著。与 P1 处理相比，P2、P3 处理的磷肥偏生产力没有显著变化，然而当稻季磷肥全部前移且减量施用 (P4、P5、P6 处理) 却显著提高了磷肥偏生产力，分别提高了 6.7%、19.3% 与 42.3%。与 P1 处理相比，所有的磷肥前移处理均显著提高了磷肥回收效率，其中以 P3、P4 处理回收效率较高，分别是 P1 处理的 2.9 倍与 2.0 倍。统筹考虑磷素利用效率和作物周年产量，将晚稻全部磷肥前移同玉米底肥一起施用，不但可以增加系统的周年产量，还可以实现资源的高效利用。

3 讨论

磷是土壤中移动性较差的养分元素，前人研究认为水旱轮作是提高土壤磷有效性的常见方法^[17]，因为季节间的干湿交替影响了土壤中磷的化学行为和有效性。宋雄儒等^[18] (2015) 研究表明，温度的变化通过影响微生物的活性而影响磷的矿化，随着温度的升高，磷的矿化程度越高。在本研究中，玉米种植期温度低，高磷促进玉米的生长，晚稻季前中期温度高，有利于促进土壤中被固定磷的释放，但基于长江中游气温的周年变化对玉-稻水旱轮作磷素合理施用的影响机制还有待进一步研究验证。在稻田淹水后，其氧化还原电位降低，土壤中与磷结合的化合物价位会发生变化，将固定的磷释放出来；同时其溶解度增加，从而提高磷的有效性^[19]，另外，氧化还原电位下降会促进土壤中有机质降解，将有机质中固定的磷释放出来^[20, 21]，这些都会导致磷肥在后茬水稻上表现出明显的残效效应^[22, 23]。本研究发现稻季磷肥前移在玉米季施用，在玉米收获时可使土壤保持较高的土壤速效磷水平 (表 4)，有利于保证晚稻移栽后对土壤磷的需求。马保国等^[24] (2005) 研究也表明施磷对当季作物有增产效果，而磷肥残效对后茬作物增产明显。本研究的结果表明，晚稻季不同程度的磷肥前移至玉米季，对晚稻的产量和磷肥吸收具有明显的调控作用，磷肥前移处理 (P3、P4) 在保证春玉米产量的前提下，显著增加了晚稻的有效穗数和穗粒数，提高了晚稻产量 (表 1)；晚稻季磷肥前移至玉米季并将周年磷肥减少 15% 的处理 (P5) 能够保证玉米水稻的周年产量 (与 P1 处理差异不显著)，说明周年磷肥减少 15% 时玉米季的残效磷可以满足晚稻对磷的需求。卢亚男等^[25] (2016) 研究表明，4a 的稻麦轮作条件下，通过麦季施磷稻季不施磷的措施来达到稻麦轮作农田减磷的效果在理论上具有可行性，可以同时保证作物较高产量水平和土壤磷素的环境安全。王伟妮等^[26] (2011) 研究表明水稻产量与磷肥利用率的提高是可以同步实现的。在本研究中，晚稻季不同程度的磷肥前移至玉米季的处理 (P3、P4)，不仅显著提高周年作物产量，同时提高了磷肥农学利用效率、偏生产力和吸收利用效率 (表 6)，降低了周年土壤表观盈余量以及作物对土壤磷素的依存率 (表 4、表 5)，说明磷肥在后茬晚稻上能表现出明显的残效效应，合理的施肥措施降低了作物产量对土壤磷的依赖，提高磷肥利用效率。研究表明，磷肥当季利用率虽然很低，但是随着种植季数的增加，

磷肥利用率会逐步上升,这是由于磷肥残效的叠加效果及新施磷肥以及土壤中原有磷共同作用的结果^[27, 28]。卜容燕^[3] (2014)对于水稻—油菜轮作的研究表明,随着水稻季磷肥用量的增加,油菜产量、油菜季磷肥的农学效率和磷肥贡献率显著增加,水稻季磷肥在油菜季的残留利用率达5.4%~7.3%。鲁如坤等^[29] (1965)和黄竹芝等^[30] (1990)的研究表明,在速效磷含量较低的南方土壤,以稻麦轮作或水旱轮作研究磷肥的增产效果时,提出磷肥应优先在小麦上施用或磷肥重点放在旱作上,这与本研究中晚稻季磷肥前移至玉米季的效果一致。研究表明水稻对磷肥的吸收利用率较稳定且较低,如目前全国平均水平为13.1%^[2],湖北省平均水平为13.1%,而浙江长期定位实验的结果也只有13.2%^[31],这是由于施入土壤的磷肥移动性较差,大部分转化为不易溶解的固定态磷,只有少部分转化为可被作物当季利用的有效磷^[32],即作物当季吸收的磷绝大部分来自于土壤而不是肥料。本研究中,玉米—水稻周年对土壤磷素依存率为51.84%~70.5%,即玉米—水稻吸收的磷约有51.84%~70.5%来自于土壤,只有29.5%~48.16%来自于磷肥,说明提高土壤磷素有效性是获得作物高产的重要措施,在本研究中,玉—稻轮作磷肥前移提高了晚稻生长期间的土壤磷肥利用率,增加了土壤磷素的有效性,再次证明淹水能够促进土壤中磷的释放,因此在该系统中,建议适当将水稻季的磷肥前移至玉米季,使得玉米季有充足的磷肥来满足玉米对磷的吸收和土壤固定,而在晚稻季上,应尽量减少磷的用量以充分利用土壤中溶解的磷。

4 结论

晚稻季磷肥前移施用显著提高了玉米收获时土壤速效磷的含量。周年磷肥量不变时,晚稻季磷肥不同程度前移至玉米季可显著提高玉米及晚稻的产量,明显提高了磷肥的利用效率;当周年总施磷量减少15%时,晚稻季磷肥全部前移至玉米季可同时满足玉米与晚稻对磷肥的需求,从而保证周年作物产量。可见,玉米季施用的磷肥在晚稻季能表现出明显的后效作用,且比晚稻当季施用磷肥具有更高的磷肥利用效率。所以在春玉米免耕复种晚稻时,将晚稻季的磷肥全部前移至玉米季施用,并可适当减少周年磷肥总量至15%,可保障两季作物产量,并能提高磷肥利用率。

参考文献:

- [1] KUO S, HUANG B, BEMBENEK R. Effects of long-term phosphorus fertilization and winter cover cropping on soil phosphorus transformations in less weathered soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 41(2): 116—123.
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. *土壤学报*, 2008, 9(5): 915—924.
- 【ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nitrogen use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 9(5): 915—924.】
- [3] 卜容燕,任涛,鲁剑巍,等. 水稻—油菜轮作条件下磷肥效应研究 [J]. *中国农业科学*, 2014, 47(6): 1227—1234.
- 【BU R L, REN T, LU J W, et al. Analysis of P fertilizer efficiency under rice-rapeseed rotation system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*. 2014, 47(6): 1227—1234.】
- [4] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259—273.
- 【ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 259—273.】

[5] 汤秋香, 任天志, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特征研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3) : 608—615

【TANG Q X, REN T Z, LEI B K, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in various crop rotation systems in northern watershed of Erhai Lake [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3) : 608—615. 】

[6] TURNER B L, BAXTER R, WHITTON B A. Nitrogen and phosphorus in soil solutions and drainage streams in Upper Teesdale, northern England: implications of organic compounds for biological nutrient limitation [J]. Science of Total Environment, 2003, 314: 153—170.

[7] 程传敏, 曹翠玉. 水旱轮作中不同类型土壤无机磷形态转化及其有效性的比较 [J]. 南京农业大学学报, 1996, 19(4) : 32—36.

【CHENG C M, CAO C Y. Transformation and availability of inorganic phosphorus in different soils during the paddy-upland rotation of soils [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1996, 19(4) : 32—36. 】

[8] SINGH Y, DOBERMANN A, SINGH B, et al. Optimal phosphorus management strategies for wheat-rice cropping on a loamy sand [J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64: 1413—1422.

[9] MOHARANA P C, SHARMA B M, BISWAS D R, et al. Longterm effect of nutrient management on soil fertility and soil organic carbon pools under a 6-year-old pearl millet-wheat cropping system in an Inceptisol of subtropical India [J]. Field Crops Research, 2012, 136: 32—41.

[10] 范明生, 樊红柱, 吕世华, 等. 西南地区水旱轮作系统养分管理存在问题分析与策略建议 [J]. 西南农业学报, 2008, 21(6) : 1564—1568.

【FAN M S, FAN H Z, LV S H, et al. The current status of nutrient management and strategy in paddy rice-upland crop rotation in southwest China [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(6) : 1564—1568. 】

[11] 李小勇, 唐启源, 李迪秦, 等. 不同种植密度对超高产稻田春玉米产量性状及光合生理特征的影响 [J]. 华北农学报, 2011, 26(5) : 174—180.

【LI X Y, TANG Q Y, LI D Q, et al. Effects of different plant densities on the photosynthetic-physiological characters and yield traits in spring maize grown on super-high yielding paddy field [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica. 2011, 26(5) : 174—180. 】

[12] 李淑娅, 田少阳, 袁国印, 等. 长江中游不同水稻种植模式产量及资源利用效率的比较研究 [J]. 作物学报, 2015, 41(10) : 1537—1547.

【LI S Y, TIAN S Y, YUAN G Y, et al. Comparison of yield and resource utilization efficiency among different maize and rice cropping systems in middle reaches of Yangtze River [J]. Acta Agronomica Sinica. 2015, 41(10) :

[13] TIMSINA J, JAT M L, MAJUMDAR K. Rice-maize systems of South Asia: current status, future prospects and research priorities for nutrient management [J]. *Plant and Soil*, 2010, 335(1-2): 65-82.

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

【LU R K, Soil Agriculture chemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Technology Press, 2000.】

[15] 黄晶, 张杨珠, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤性水稻土有效磷的演变特征及对磷平衡的响应 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49(6): 1132-1141.

【HUANG J, ZHANG Y Z, XU M G, et al. Evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to phosphorus balance in paddy soil derived from red earth under longterm fertilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6): 1132-1141.】

[16] 张国桥, 王静, 刘涛, 等. 水肥一体化施磷对滴灌玉米产量、磷素营养及磷肥利用效率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1103-1109.

【ZHANG G Q, WANG J, LIU T, et al. Effect of water and P fertilizer coupling on corn yield, P uptake, and P utilization efficiency with drip irrigation in a calcareous soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1103-1109.】

[17] BUNEMANN E K, KELLER B, HOOP D, et al. Increased availability of phosphorus after drying and rewetting of a grassland soil: processes and plant use [J]. *Plant and soil*, 2013, 370:511-526.

[18] 宋雄儒, 尚振艳, 李旭东, 等. 贺兰山西坡不同海拔梯度草地土壤磷特征及其影响因素 [J]. *草业科学*, 2015, 32(7): 1054-1060.

【SONG X R, SHANG Z Y, LI X D, et al. Soil phosphorus and influencing factors in the grasslands at different elevations on west-slope of Helan Mountain, Inner Mongolia [J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(7): 1054-1060.】

[19] SURIYAGODA L D B, RYAN M H, RENTON M, et al. Plant responses to limited moisture and phosphorus availability: a meta analysis [J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 12: 143-200.

[20] TURNER B L, HAYGARTH P M. Biogeochemistry: phosphorus solubilization in rewetted soils [J]. *Nature*, 2001, 411: 251-258.

[21] BLACKWELL M, BROOKES P, DE LA FUNETE-MARTINEZ N, et al. Phosphorus solubilization and potential transfer to surface waters from the soil microbial biomass following drying-rewetting and freezing-thawing [J]. *Advances in Agronomy*, 2010, 106:1-35.

[22] 张仕祥, 李辉信, 胡锋, 等. 早稻磷肥残效对当年晚稻产量的影响 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(4): 611-616.

【ZHANG S X, LI H X, HU F, et al. Residual effect of phosphorus fertilizer applied to early-rice on yield composition of late rice [J]. Acta Pedol Sin, 2006, 43(4) : 611—616. 】

[23] 戴茨华, 王劲松, 代平. 从长期定位试验论红壤施磷的残效 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(11) : 93—97.

【DAI C H, WANG J S, DAI P. Studies on the residual effect of application phosphorus on red soil of a long-term experiment [J]. Chin Agric Sci Bull, 2009, 25(11) : 93—97. 】

[24] 马保国, 杨太新, 郭凤台, 等. 麦稻轮作体系中磷素平衡的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2) : 371—374.

【MA B G, YANG T X, GUO F T, et al. Balance of phosphorus in a rotation system with winter-wheat and rice [J]. Journal of Agro-Environment Science. 2005, 24(2) : 371—374. 】

[25] 卢亚男, 汪玉, 王慎强, 等. 太湖稻麦轮作农田减施磷肥盆栽试验研究 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3) : 507—513.

【LU Y N, WANG Y, WANG S Q, et al. Reduced P fertilization for rice /wheat rotation in Taihu Lake region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(3) : 507—513. 】

[26] 王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施磷增产效应及磷肥利用率研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4) : 795—802.

【WANG W N, LU J W, LU M X, et al. Effect of phosphorus fertilizer application and phosphorus use efficiency of early, middle and late rice in Hubei Province [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4) : 795—802. 】

[27] 谢坚, 郑圣先, 廖育林, 等. 缺磷型稻田土壤施磷增产效应及土壤磷素肥力状况的研究 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(3) : 147—154.

【XIE J, ZHENG S X, LIAO Y L, et al. The effects of phosphorus application on rice yield increasing efficiency of phosphorus and soil phosphorus status in different type of paddy soil of phosphorus deficiency [J]. Chin Agric Sci Bull, 2009, 25(3) : 147—154. 】

[28] REDDY D D, RAO A S, RUPY T R. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a Vertisol. Bioresour [J]. Technol, 2000, 75: 113—118.

[29] 鲁如坤, 牟润生. 磷肥对水稻和旱作的肥效及其后效的研究 [J]. 土壤学报, 1965, 13(2) : 152—159.

【LU R K, MOU R S. Effects of fertilizer on rice and dry cultivation fertilizer efficiency [J]. Acta Pedologica Sincia, 1965, 13(2) : 152—159. 】

[30] 黄竹芝, 黄启武, 曹翠玉, 等. 石灰性土壤上磷肥的效应 [J]. 土壤, 1990(6) : 326—327.

【HUANG Z Z, HUANG Q W, CAO C Y, et al. Effects of phosphate fertilizer on calcareous soil [J] . Soils, 1990 (6) :326—327. 】

[31] 鲍碧娟. 如何提高磷肥利用率 [J] . 磷肥与复肥, 1995, 12(1) : 65—67.

【BAO B J. How to increase phosphate use efficiency [J] . Phosph. & Comp. Fert. , 1995, 12(1) : 65—67.】

[32] 周全来, 赵牧秋, 鲁彩艳, 等. 磷肥施入土壤后的变化进程及对磷淋失的影响 [J] . 生态与农村环境学报, 2006, 22(3) : 80—83.

【ZHOU Q L, ZHAO M Q, LU C Y, et al. Change of fertilizer after of application into soil and its influence on P leaching loss [J] . J Ecol Rur Environ, 2006, 22(3) : 80—83. 】